

大安市地下水动态变化趋势及驱动因素研究

张真真^{1,2}, 卞建民^{1,2}, 李天宇^{1,2}, 高月^{1,2}

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130021;
2. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021)

摘要:为研究大安市地下水位的变化特征及其主要控制因素,根据大安市气候因素、引水灌溉水量、地下水开采和地下水埋深等数据资料,分析了环境因素的变化规律及趋势,基于suffer软件利用克里格方法对地下水埋深进行插值,分析其时空演变规律及驱动因素。结果表明,降水量呈波动增加的趋势,平均年降水量增量为0.249mm/a;蒸发量呈波动下降的趋势,平均年蒸发量增量为-2.063mm/a;引水灌溉水量呈增加趋势,平均年灌溉水量增量为 $0.212 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 。潜水埋深呈小幅度减小趋势,年均倾斜率为-0.023m/a,承压水埋深呈波动上升趋势,年均倾斜率为0.146m/a。承压水动态变化的驱动因子由大到小依次为人工开采(主要是农业开采与生活用水)、引水灌溉、降水、蒸发,农业开采是最主要的影响因子。研究结果可为制定完善的水资源调控方案提供理论依据。

关键词:地下水动态;环境因子;变化趋势;驱动因素

中图分类号:S273.4,TV211.1+2

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)04-0091-06

地下水资源在生产生活、经济发展及生态环境等各个方面都起着重要作用。随着气候变化、经济社会发展及人口增加,地表水资源严重紧缺,地下水资源逐渐成为人们赖以生存的供水水源,尤其是在干旱半干旱气候区,水资源不稳定性及供需矛盾日益突出^[1]。因此,分析变化环境下的地下水动态演变趋势,探讨其驱动因子,对于深入认识区域地下水循环规律,科学地应对变化环境对地下水资源的影响,保证水资源可持续开发利用具有重要意义。近年来,变化环境对地下水资源的影响受到国内外学者的广泛关注。Croley TE^[2]指出,气候变化使含水层补给量在夏季减少,在春季和冬季增加;贾瑞亮等^[3]针对气候变化对地下水资源的影响提出了水资源合理开发利用的适用性对策;张文化等^[4]通过构建模型定量分析了气候变化与人类活动对地下水水位的影响程度;杜伟等^[5]运用统计水文学方法研究了地下水水位在各影响因素驱动下的发展趋势。这些研究对于分析变化环境对地下水演变的影响有重要的推动作用,但由于地下水系统本身具有的复杂性及环境影响因子的多样性,对于变化环境影响下的地下

水动态还需进行深入研究。

大安市位于我国生态环境脆弱带上,土地荒漠化严重,用水紧缺,地下水开采量增加^[6],为有效缓解水资源短缺问题,2006年建设灌区,引用嫩江水灌溉农田,引水灌溉增加了对地下水系统的补给量,给区域生态环境带来影响,因此,本文通过对大安市变化环境因素的趋势分析,研究地下水动态演变趋势及驱动因素,旨在为应对气候变化、保障地下水资源合理利用提供理论依据。

1 环境背景及问题

1.1 区域自然地理及水文地质条件

大安市位于吉林省西北部,东经 $123^{\circ}08'45'' \sim 124^{\circ}21'56''$,北纬 $44^{\circ}57'00'' \sim 45^{\circ}45'51''$ 。区域多年平均降水量为413.7mm,降水主要集中在6~8月,雨季降水量约占全年降水量的82.8%,年累计蒸发量达到1719.6mm。该区地下水类型为孔隙潜水和孔隙承压水,浅层孔隙潜水补给来源为大气降水,西部冲洪积扇形地的地下径流补给及农业灌溉水,排泄方式为蒸

收稿日期:2014-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41072255);吉林省自然科学基金项目(201115035)

作者简介:张真真(1991-),女,山东济南人,硕士,研究方向为水资源评价及水环境与水生态效应。E-mail: zhangzhenzhen9101@126.com

通讯作者:卞建民(1968-),女,吉林长春人,博士、教授、博导,研究方向为水资源评价及水环境与水生态效应。E-mail: bianjianmin@126.com

发排泄；孔隙承压水补给来源为地下水的侧向径流补给以及上覆潜水含水层的越流补给，主要排泄方式为人工开采^[7]。

大安灌区位于大安市东部，灌区总引水 $5.86 \times 10^8 \text{m}^3$ ，农业灌溉供水 $4.77 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其余为输水损失。设计灌溉面积 594.4km^2 ，水田面积 365.3km^2 ，水浇地面积 229.1km^2 。灌区西部退水排入小西米泡，北部退水进入王家苇子人工芦苇湿地，中部和南部退水排入大安灌区南部的人工芦苇湿地^[8]。

1.2 研究区存在的主要问题

受水文和气象因素影响，研究区水资源可利用量变化较大，特别是持续干旱导致的农业用水紧缺问题严重阻碍了该区发展。为解决用水严重不足的现状，研究区加大地下水开采力度，区域水位持续下降。而灌区引入地表水进行农田灌溉，又增加了对地下水系统的补给量，地下水天然动态平衡遭到破坏，土壤沙化、碱化、退化问题突出，区域各类土壤中，轻度盐化草甸土占 31.6%，中度盐化草甸土占 30.5%，重度盐化草甸土（含碱土和盐土）占 37.9%，草原退化最为明显，土壤荒漠化正以每年 1.8% 的速度扩张^[9]，生态环境恶化严重。

2 影响因子的变化趋势分析

2.1 地下水系统的环境影响因子

地下水系统是指由输入、输出及系统实体三部分组成的整体，受地表水系统输入输出控制^[10]，大安市地下水系统是受自然因素和人为因素控制的复杂系统，系统所处的外界环境主要是指大气系统、地表水系统及人类活动系统，引起地下水动态变化的环境因素主要表现为降水、蒸发、引水灌溉、地下水开采。

2.2 气候因素变化趋势

气候变化对水资源的影响直接体现在水资源量的

变化及水循环系统的各个环节的变化上，地下水作为水资源系统的重要组成部分，受气候变化影响显著，具有影响范围广、持续时间长、影响程度大的特点^[11]。根据研究区 1960~2009 年降水量与蒸发量实测值进行线性趋势分析和 Mann-Kendall 检验，结果见图 1 和图 2。

综合比较图 1 和图 2 可以看出，降水量的年际变化较大，20 世纪 60 年代降水量稍高于多年降水量平均值；70 年代降水量较小，蒸发量较大并呈增加的趋势，干旱严重；80、90 年代降水量增加，蒸发量大幅减小，2000 年之后降水及蒸发变化极不稳定，出现丰、枯水年。1965 年、1982 年和 2007 年为特枯年，降水量分别为 256.2mm、260.3mm 和 268.5mm，1998 年和 2005 年为丰水年，降水量分别为 654mm 和 769.4mm，丰水年降水量平均为枯水年的 2~3 倍。从总体变化趋势来看，在 $\alpha=0.001$ 的显著水平下，大安市降水量呈波动增加的趋势，平均年降水量倾斜率为 0.249mm/a ，

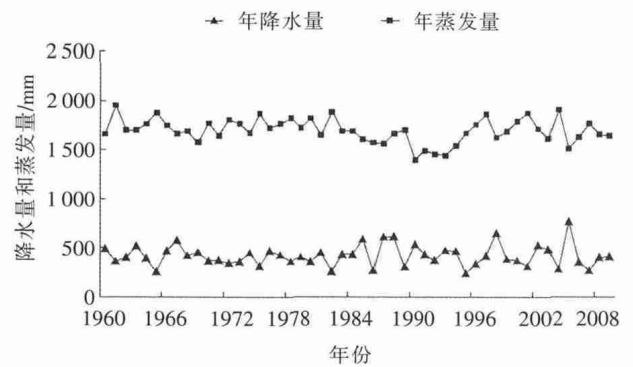
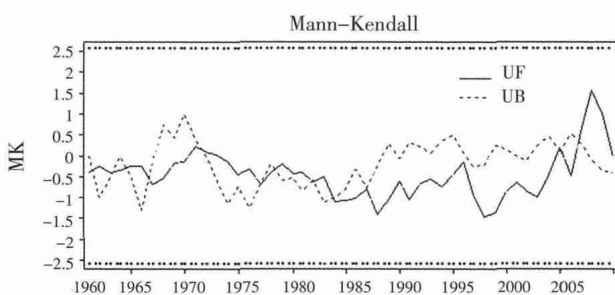
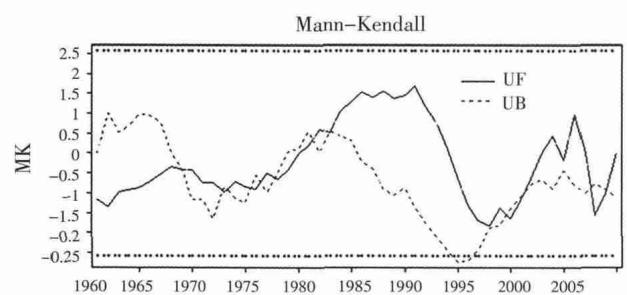


图 1 大安市多年平均降水量及蒸发量变化图

Fig.1 The changes of the precipitation and evaporation in Da'an City for many years



(a)降水



(b)蒸发

图 2 大安市 1960~2009 年降水量与蒸发量 M-K 统计量检验结果

Fig.2 M-K statistic tests of the precipitation and evaporation in Da'an City from 1960 to 2009

而蒸发量呈波动下降的趋势,平均年蒸发量倾斜率为 -2.063mm/a ,降水量呈不显著增加趋势,蒸发量呈不显著减小趋势,在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下,蒸发量显著下降,在60年代后期发生突变,在90年代中期和后期达到显著水平。如果仅从气候条件考虑,这种变化趋势对于研究区地下水补给是有利的,有可能引起地下水位抬升。

2.3 人为因素变化趋势

人类活动主要是通过影响地下水系统的补给与排泄而影响地下水动态的,主要表现在两个方面,一是通过开采利用地下水对地下水资源量造成的直接影响;二是通过建设水利设施改变下垫面特征而造成的间接影响^[12]。研究区内灌区的建设实施是影响地下水资源的重要因素,人类活动因素主要表现为引水灌溉及地下水开采。

2.3.1 引水灌溉水量

大安灌区建设实施后,大量引用地表水进行农田灌溉。2000~2009年引水灌溉水量变化趋势如图3所示。

由图3可知,大安市多年平均引水灌溉水量为 $4.061\times 10^8\text{m}^3$,从线性趋势线可看出,灌溉水量呈逐年增加的趋势,平均年灌溉水量增加率为 $0.212\times 10^8\text{m}^3/\text{a}$,增加趋势明显。相比2001年,2009年灌溉水量增加了1.402倍。在研究区干旱的气候条件下,灌溉水量的大幅增加会抬高地下水位,尤其是潜水位。当地下水位抬升到一定程度会增加盐碱化发生的概率,对灌区的生态环境是极为不利的。

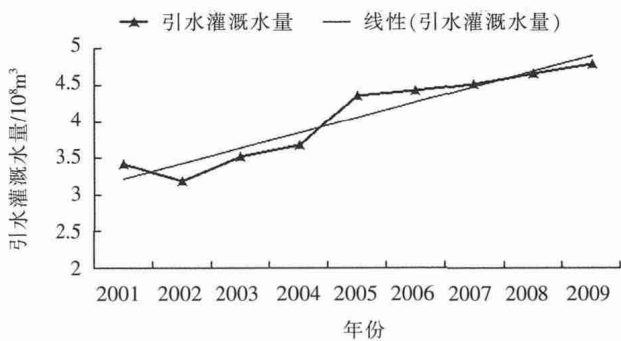


图3 2001~2009年大安市引水灌溉水量变化趋势

Fig.3 The Change trends of the irrigated water amount in Da'an City from 2000 to 2009

2.3.2 地下水开采量

研究区地下水天然资源量为 $5.315\times 10^8\text{m}^3$,实际

开采资源量为 $4.025\times 10^8\text{m}^3$,其中,承压水多年平均开采量为 $3.367\times 10^8\text{m}^3$,占资源总量的83.652%^[13],因此,研究区主要以开采承压水为主,潜水开采量较少,本次研究主要针对承压水多年平均开采量进行,2000~2009年大安市承压水开采量变化曲线见图4所示。

从图4可以看出,农业多年平均开采量为 $1.462\times 10^8\text{m}^3$,占总多年平均开采量的43.42%,工业及生活多年平均开采量分别为 $0.533\times 10^8\text{m}^3$ 、 $1.372\times 10^8\text{m}^3$,分别占多年平均开采量的15.83%、40.75%。农业开采量呈减小趋势,工业和生活用水的开采量呈增加趋势,农业和生活开采量波动较大,综合分析图1、3、4可知,大安灌区引入地表水进行农田灌溉后,农业开采量有所减少,工业及生活开采量明显增加,但是受气候干旱的影响,2008~2009年,农业开采量和生活开采量又急剧增加。

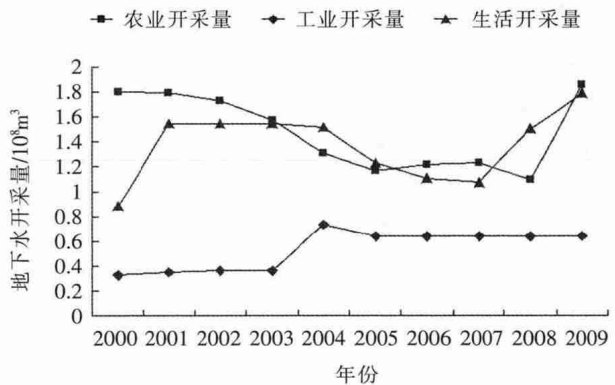


图4 2000~2009年大安市地下水开采量变化

Fig.4 The exploitation of the groundwater in Da'an City from 2000 to 2009

3 地下水动态演变趋势分析

3.1 地下水水位的时间变化

地下水水位动态变化是反映含水层中地下水资源量变化的重要指标之一,地下水埋深的上升或下降能够直接反映地下水补给与消耗的变化。选取大安市内的潜水井#26630001、#26630007和承压水井#26630018、#26630025作为典型井,利用2000~2009年的年均地下水埋深数据绘制埋深变化历时曲线,如图5所示。

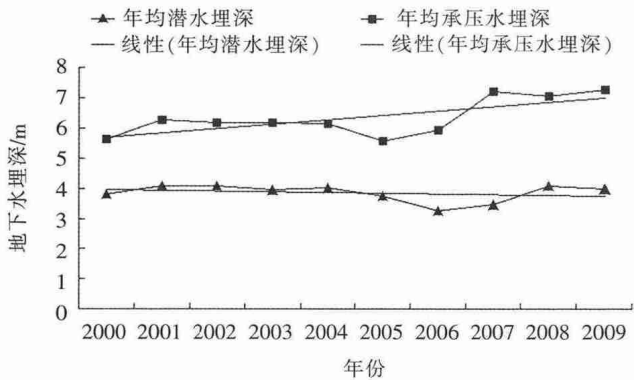


图5 2000~2009年地下水埋深变化趋势

Fig.5 The change tendency of groundwater depth from 2000 to 2009

从地下水埋深的整体变化趋势可以看出，潜水埋深呈小幅度减小趋势，年均倾斜率为 -0.023m/a ，承压水埋深呈波动上升趋势，年均倾斜率为 0.146m/a 。2000~2005年，潜水和承压水埋深变化幅度都不大，潜水埋深从 3.813m 逐年变化到 3.261m ，潜水埋深减小约 0.552m ，承压水埋深从 5.694m 逐年变化到 5.563m ，承压水埋深减小约 0.131m ；2006~2009年，埋深变幅明显，潜水埋深减小 0.824m ，承压水埋深增大了 2.031m 。

3.2 地下水位的空间变化

由以上分析可知，承压水开采量较大，受人类活动干扰强度较大，因此仅对承压水的空间变化特征进行分析。选择均匀覆盖整个研究区范围的60眼观测井，基于surfer软件利用克里格模型分别对2000年、2005年和2009年的承压水埋深进行空间插值，得到空间分布图(见图6)。

由图6可以看出，2000~2009年，承压水埋深普遍增加，全区平均增幅为 2.113m ，增大幅度最大的区域

主要集中在西北部及东部，包括烧锅镇、丰收镇、舍力镇、叉干镇等地，最大增幅达 5.699m ，增幅较小的区域主要在南部及东南部区域，包括新平安镇、海坨乡等地，最小增幅 0.172m 。承压水埋深较小的区域主要集中在南部龙沼镇、大岗子镇等地，平均减小幅度为 1.028m 。对比分析图6(a)~(c)可知，2005年之前，承压水埋深普遍增大，西北部及东部变幅较大，增幅约为 $2\sim 4\text{m}$ ，2005年之后，承压水埋深变化幅度较小，仅在舍力镇、大岗子镇、烧锅镇等局部地区埋深明显增加。

4 地下水位变化的驱动因素分析

综合考虑气候因素(降水和蒸发)和人类活动(引水灌溉和地下水开采)对承压水动态变化的影响，利用主成分分析法计算和分析各影响因素的影响程度。选取2000~2009年的农业开采量(X_1)、工业用水量(X_2)、生活用水量(X_3)、引水灌溉水量(X_4)、年降水总量(X_5)、年蒸发总量(X_6)作为主要影响因子，通过建立相关方程分析地下水动态的主要影响因素。

利用SPSS计算每个影响因素的原始数据，提取三个主成分，对应的贡献率分别为 45.01% 、 30.62% 、 22.31% ，可用这三个主成分代替原来的6个影响因子。根据提取的三个主成分及其贡献率，为建立主成分综合模型，将原始数据变量进行标准化处理，得到综合模型如下式：

$$F=0.41ZX_1+0.09ZX_2+0.34ZX_3-0.24ZX_4-0.21ZX_5+0.15ZX_6 \quad (1)$$

式中： F 为主成分变量； ZX_i 为标准化后的数据变量。

综合表达式中，每个指标对应的系数代表该指标的权重，通过对比权重大小，可以判定指标的影响程

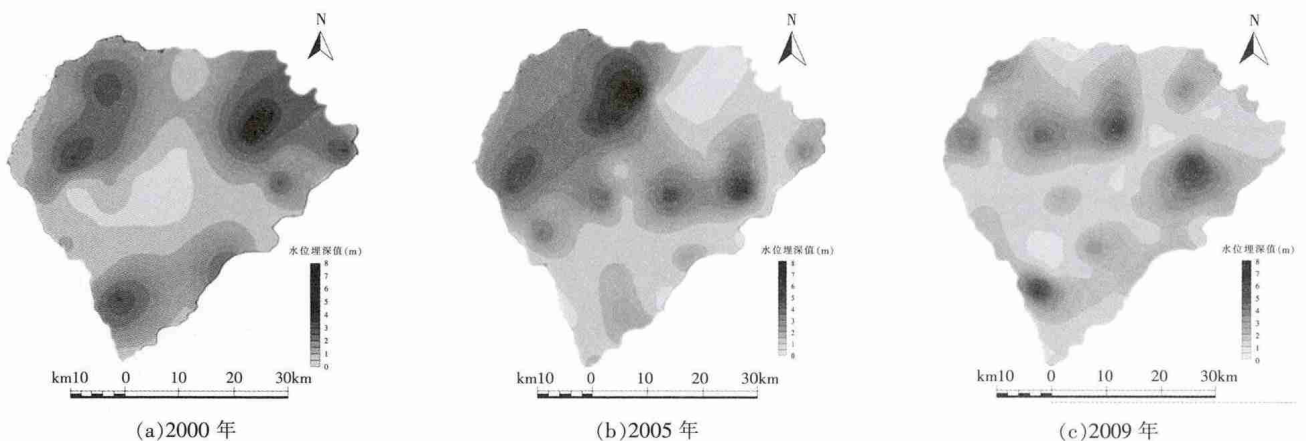


图6 大安市承压水埋深变化空间分布图

Fig.6 The spatial distribution of the groundwater depth variation in Da'an City

表1 各年份综合得分及排名表

Table 1 The comprehensive score and ranking for many years

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>F</i>	0.52	1.13	0.33	-0.19	-0.04	-1.46	-0.63	-0.39	-0.75	1.29
排名	3	2	4	6	5	10	8	7	9	1

度。将标准化后的数值代入式(1),计算得到2000~2009年主成分综合得分,并进行排名,得分及排名见表1。

综合分析式(1)和表1,承压水动态变化的驱动因子由大到小依次为农业开采、生活用水、引水灌溉、降水、蒸发、工业开采。在地下水开发利用过程中,农业开采对地下水水位的影响最大,且随着年份增加,对地下水水位的影响越来越大。2000~2004年,各因素对地下水埋深的综合影响力较大,2005~2008年综合影响力减小,此后影响力又呈增加的趋势,表明大安灌区的运行实施减少了地下水开采量,同时增加了灌区地下水的补给量,对地下水资源的保护起到了一定的作用。结合图1可知,2007年降水量减少了154.62mm,降水量大幅度减少使人工开采量增加,从而导致2009年受各因子的综合影响最大。因此,研究区需要调整农业结构,提高农灌效率,对于地下水资源的合理利用及保护有重要意义。

5 结论

本文对研究区环境因素的变化趋势进行分析,研究了地下水位的时空变化规律,利用主成分分析法分析了变化环境因素与地下水水位之间的相关性,得出的主要结论归纳如下。

(1)大安市环境因素主要包括气象因素及人类活动,气象因素主要包括降水和蒸发,人类活动主要包括引水灌溉和地下水开采,而地下水开采主要包括工、农业开采用水和生活开采用水。降水量整体上呈波动增加的趋势,蒸发量呈不显著减小的趋势,引水灌溉水量呈明显上升趋势,农业用水量呈波动下降趋势。

(2)地下水埋深的时间变化特征表现为,潜水埋深呈小幅度减小趋势,年均倾斜率为 -0.023m/a ,承压水埋深呈波动上升趋势,年均倾斜率为 0.146m/a 。空间变化特征表现为,承压水埋深普遍增加,平均增幅为 2.113m ,最大增幅达 5.699m ,主要在集中在西北部及东部;最小增幅 0.172m ,主要在内部及东南部区域。埋深减小的区域主要集中在南部龙沼镇、大岗子镇等地,

平均减小幅度为 1.028m 。

(3)承压水动态变化的驱动因子由大到小依次为人工开采、引水灌溉、降水、蒸发,农业开采是人工开采中影响最大的因子,影响程度呈逐年增加的趋势。因此,应根据研究区地下水水位变化特征,联合利用地表水和地下水,既能缓解超采,还可以避免因水位升高引发的土壤盐碱化等生态环境问题,为水资源可持续利用提供重要保障。

参考文献:

- [1] 张向飞,周维博,云涛,等. 渭北旱塬区地下水动态研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(1):89-93. (ZHANG Xiangfei, ZHOU Wei-bo, YUN Tao, et al. Dynamic research on groundwater in Weibeiupland [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012,23(1):89-93. (in Chinese))
- [2] Croley T E, Luukkonen C L. Potential effects of climate change on groundwater in Lansing, Michigan [J]. Journal of American Water Resources Association, 2003,39(1):149-163.
- [3] 贾瑞亮,周金龙,李巧,等. 我国气候变化对地下水资源影响研究主要进展[J]. 地下水, 2012,34(1):1-4. (JIA Ruiliang, ZHOU Jinlong, LI Qiao, et al. Main progress of effect research of chinese climate changes on groundwater resources[J]. Ground Water, 2012,34(1):1-4. (in Chinese))
- [4] 张文华,魏小妹,李彦刚,等. 气候变化与人类活动对石羊河流域地下水动态变化的影响 [J]. 水土保持研究, 2009,16 (1):183-187. (ZHANG Wenhua, WEI Xiaomei, LI Yangang, et al. Groundwater dynamic evolution under climatic change and human activities in Shiyang river basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009,16(1):183-187. (in Chinese))
- [5] 杜伟,魏小妹,李萍,等. 变化环境下灌区地下水动态演变趋势及驱动因素[J]. 排灌机械工程学报, 2013,31(11):993-999. (DU Wei, WEI Xiaomei, LI Ping, et al. Dynamic evolutionary tendency of groundwater in irrigation district in changing environment and its driving factors [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013,31(11):993-999. (in Chinese))
- [6] 卞建民,汤洁,林年丰,等. 半干旱地区水资源承载能力研究—以松嫩平原西南部霍林河流域为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006,36(1):73-77. (BIAN Jianmin, TANG Jie, LIN Nianfeng, et al. Research on water resource carrying capacity in semiarid area—a case study in Huolin river basin, southwestern songnen plain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006,36(1):73-77. (in Chinese))

- [7] 李晓燕, 张树文. 吉林省大安市近 50 年土地盐碱化时空动态及成因分析[J]. 资源科学, 2005,27(3):92-97. (LI Xiaoyan, ZHANG Shuwen. Tempo-spatial dynamics and driving factors of saline-alkali land in Da'an city of Jilin province [J]. Resources Science, 2005,27(3):92-97. (in Chinese))
- [8] 杨占梅. 大安灌区土壤水盐运移的试验及模拟研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012. (YANG Zhanmei. Test and Simulation of the Soil Water and Salt Movement in Da'an Irrigation area [D]. Jilin: Jilin University, 2012. (in Chinese))
- [9] 林年丰, 汤洁. 松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析[J]. 第四纪研究, 2005,25(4):474-483. (LIN Nianfeng, TANG Jie. Study on the environment evolution and the analysis of causes to land salinization and desertification in songnen plain [J]. Quaternary Sciences, 2005,25(4):474-483. (in Chinese))
- [10] 乔光建. 地下水功能区划分研究[J]. 水文, 2009,29(4):90-93,70. (QIAO Jianguang. Study on groundwater regionalization according to the concerned functions [J]. Journal of China Hydrology, 2009,29(4):90-93,70. (in Chinese))
- [11] 胡巍巍, 王式成, 王根绪, 等. 安徽淮北平原地下水动态变化研究[J]. 自然资源学报, 2009,24(11):1893-1901. (HU Weiwei, WANG Shicheng, WANG Genxu, et al. Study on the groundwater dynamic of the Huabei alluvial plain in Anhui province [J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(11):1893-1901. (in Chinese))
- [12] 王金哲, 张光辉, 母海东, 等. 人类活动对浅层地下水干扰程度定量评价及验证[J]. 水利学报, 2011,42(12):1445-1451. (WANG Jinzhe, ZHANG Guanghui, MU Haidong, et al. Quantitative valuation and validation of the influence degree of human activities on shallow groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(12):1445-1451. (in Chinese))
- [13] 张丽姝. 引水灌溉对大安市地下水及表生生态景观的影响研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012. (ZHANG Lishu. Study on the Groundwater and Ecological Landscape Influenced by Diversion Project in Da'an County. Jilin: Jilin University, 2012. (in Chinese))

Analysis of Variation Trend and Driving Factors of Groundwater Dynamic in Da'an City

ZHANG Zhenzhen^{1,2}, BIAN Jianmin^{1,2}, LI Tianyu^{1,2}, GAO Yue^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: The purpose of the paper is to study the variation trend of groundwater dynamic in Da'an City and analyze the degree of the influences on it. According to the data of climate and surface water irrigation, groundwater exploitation, and groundwater depth, this paper analyzed the tendency of environmental factors and the temporal and spatial evolution of the groundwater depth by means of ArcGIS software and kriging methods, and then identified the main factors for deriving change in groundwater depth. The results show that the precipitation presents a fluctuated increasing trend and its average increase slope is 0.249mm/a, the evaporation shows a fluctuated decreasing trend and its average decrease slope is -2.063mm/a, the irrigation areas tend to a great increase and its average increase slope is 17.933acre/a. The unconfined groundwater depth exhibits a less decline tendency and its average decrease slope is -0.023m/a, and the confined groundwater depth presents a fluctuated increasing trend and its average increase slope is 0.146m/a. The main driving factors of confined groundwater dynamics are as follows: groundwater exploitation, surface water irrigation, precipitation, evaporation, and the groundwater withdrawal for agricultural irrigation is the most important factor. The study results could provide theoretical support for policymakers to develop comprehensive program of configuration control of water resource.

Key words: groundwater regime; environmental factor; evolution trend; driving factor